doi:10.13866/j.azr.2018.06.14

GPM 和 TRMM 遥感降水产品在青藏高原中部的适用性评估①

余坤伦[1,2], 张寅生[1,3], 马 宁[1], 郭燕红[1]

(1. 中国科学院青藏高原研究所地表过程与环境变化重点实验室,北京 100101; 2. 中国科学院大学,北京 100101; 3. 中国科学院青藏高原卓越创新中心,北京 100101)

摘 要: 利用青藏高原色林错流域2014年4月到2015年3月期间5个地面观测站点的降水资料,对两种遥感降水——热带降水测量计划降水产品(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)和全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)——观测产品在高海拔、寒冷条件的适用性进行了评价。通过相关性评价指标、误差统计评价指标和分类统计评价指标等对比,发现:① 无论在日和年尺度上,相较于TRMM卫星降水产品而言,GPM卫星降水产品的精确度更高;TRMM产品明显过高估测了降水量;② 两种产品对强降水事件的探测性能都有较大缺陷,GPM产品对弱降水事件的探测能力明显优于TRMM产品;③ 随着统计时间尺度的增大,GPM降水产品的精度呈明显增加趋势。

关键词: 地面观测; 遥感降水产品; GPM; TRMM; 适用性评价; 青藏高原

降水是全球范围内水循环和能量循环中必不可少的一环[1],在水圈、大气圈和生物圈之间的相互作用中扮演了重要的角色[2]。目前,降水资料大多都是通过地面台站的定位观测,因复杂地形及气候等因素的影响,地面站点分布相对稀疏,限制了区域尺度降水资料之精度。由于降水观测卫星具有实时、空间分布平均、覆盖面比较广泛、时空分辨率高等特点,逐渐被应用到各种气象水文研究中[3]。

20世纪80年代以来,科学家已经开发了30余种具有不同时空分辨率的准全球卫星降水产品,如热带降水测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),使用气候预报中心校准技术的降水数据(Climate Prediction Centre morphing technique, CMORPH),基于人工智能神经网络和远程遥感资料对降水进行预测的数据(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks, PERSIANN)和全球卫星测绘的降水数据(Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMaP)等[4]。

全球降水测量(GPM)计划是一个国际卫星星座,包括一颗核心观测卫星和约10颗合作卫星。作为GPM全球降水卫星计划的先驱者,热带降水观测卫星(TRMM)于1997年11月28日成功升空运行,主要被用来探测热带地区的降水[5]。2015年4月卫星的燃料濒临耗尽,导致其运行轨道逐渐下降,TRMM卫星已经停止运行。2014年2月28日,GPM计划的核心降水观测卫星成功发射运行,标志着从TRMM时代向GPM时代的过渡。GPM降水测量卫星不但继承了TRMM降水测量卫星的降水观测方法,还将大大提高时间和空间分辨率、观测精度以及精确性[6]。

目前,很多学者对GPM在不同地区和尺度上的适用性做出了相应的评估。Tang等[7]着眼于中国大陆地区,对GPM和TRMM进行了比较评估。结果显示,GPM性能优于TRMM,但是两种产品在高纬度、高海拔、干旱少雨地区的精确度都很低,需要改善。金晓龙等[4]利用天山周边地区2014—2015年167个地面站点的降水观测资料,将GPM与TRMM、CMORPH进行比较分析,发现GPM在各个方面都显示出对降水较好的探测性能。He等[8]结

① **收稿日期:** 2018-01-10; **修订日期:** 2018-03-23
基金项目: 国家重点研发项目(2017YFA0603101);国家自然科学基金(41661144025,41430748);中国科学院国际合作局对外合作项目(131C11KYSB20150006)
作者简介: 余坤伦(1996-),男,硕士研究生,主要从事遥感降水产品研究. E-mail: yukunlun17@mails.ucas.edu.cn
通讯作者: 张寅生. E-mail: yszhang@itpcas.ac.cn

合澜沧江流域 503 个雨量计的网络,对比分析了 GPM 与 TRMM 在不同降雨强度下的性能差异。

青藏高原系多条亚洲大江大河发源地,素以“亚洲水塔”著称[9]。大气降水作为该区水分的重要来源,是影响亚洲水塔动态过程的关键因素。然而,由于自然环境恶劣,青藏高原现有的地面台站多位于该区东部,高原中西部的地表水文气象资料尤为匮乏[10]。因此,定量评估卫星降水资料在青藏高原的适用性,不仅有助于全面揭示第三极地区降水时空格局,还对未来改进水文模型之输入、提高水文模拟及水资源预测能力具有重要意义。就卫星遥感降水资料在青藏高原的适用性评价而言,郝振纯等[11]利用江河源区 32 个地面站点观测的降水资料,对 TRMM 的适用性进行了分析,表明在月尺度上,TRMM 在青藏高原地区适用性较好。张蒙等[12]基于 2000—2012 年青藏高原地区 251 个地面站点的降水观测数据,对 CMORPH、PERSIANN 和 TRMM 的适用性进行了评估。结果显示 TRMM 的适用性相对较好。以上研究表明 TRMM 在青藏高原及其附近区域的降水探测性能较好,但是,对于 GPM 在青藏高原高海拔、寒冷地区的适用性评估研究依然罕有报道。本文选择位于羌塘高原腹地的色林错流域为主要研究区,采用色林错流域 2014—2015 年 5 个地面站点的降水观测数据,结合 TRMM 对 GPM 在色林错流域高海拔、寒冷环境下的适用性进行精确度分析,选择更加精确的降水产品为研究青藏高原地区降水提供基础数据。

1 研究区域概况

色林错位于青藏高原中部,地处羌塘高原腹地,行政区划是西藏班戈县、申扎县和双湖县的接壤处[13]。色林错湖面海拔为 4 530 m,流域面积达 45 530 km^2,系西藏最大的湖泊流域[14]。遥感监测显示,近 40 a 来色林错湖泊面积呈显著扩张之势,由 20 世纪 70 年代的 1 667 km^2 扩张到 2014 年的 2 391 km^2,成为西藏第一大湖。色林错常年径流补给的河流主要有 4 条,其中最长的是发源于唐古拉山,从色林错北岸汇入的扎加藏布,全长达 409 km。色林错流域属于高原寒带半干旱季风区,全年干湿季分明。年平均气温在 0.8 ~ 1 ℃,最热年平均气温可达 6.9 ℃,年平均降水量 290 ~ 321 mm[15],年平均风速为 3.8 m·s^{-1},年平均日照时长 2 951.8 h[16]。

2 数据与方法

本研究拟评估的卫星降水资料为 GPM 和 TRMM,下载于美国航空航天局的降水测量计划网站(http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads)。GPM 降水资料的时间分辨率为 0.5 h,空间分辨率为 0.1°;TRMM 的时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.25°。本研究主要选取 2014 年 4 月 1 日至 2015 年 3 月 31 日的资料。为了评估卫星降水的准确性,本研究使用了 5 个地面站点的降水观测数据(图 1)。其中,中国气象局申扎站、班戈站和安多站资料源于国家气象科学数据共享平台(http://data.cma.cn/)。除此之外,本课题组在色林错湖的东岸和色林错中心岛处亦布设了与中国气象局基准气象站相同类型的 CSPG 雨量筒[17],该雨量筒观测精度为 0.1 mm,观测频率为每次 1 h,故上述 2 个点的降水观测资料亦用作地面参考值。色林错流域 5 个地面站点的空间分布见图 1,时间尺度亦为 2014 年 4 月1 日至 2015 年 3 月 31 日。

为了综合评估 GPM 和 TRMM 的适用性,本文主要采用以下指标进行评估:① 相关性评价指标:皮尔逊相关系数(R)。② 误差评价指标:相对误差(percent bias,简称 PB)和均方根误差(root mean square error,简称 RMSE),PB 和 RMSE 可反应卫星降水数据相对于地面站点观测数据误差的整体水平。③ 分类统计指标:错报率(false alarm ratio,简称 FAR)、探测率(probability of detection,简称 POD)、HKS 评分(hanssen and kuipers score)和频率偏差 BIAS。为了反映卫星降水产品针对不同降雨强度的表现,以一天为步长,设定不同的降水阈值(如 0.5、1、2、5、10、20 mm·d^{-1}),统计每个阈值下的降水事件次数,并分别计算新的评价指标值,相应统计方法见表 1。

表 1 分类统计指标的参数

Tab.1 Parameters of the classification statistical indexes

观测值≥阈值	观测值＜阈值	降水事件数量
H	F	探测到的总次数
M	Z	没有探测到的总次数
观测到的总次数	没有观测到的总次数	总的降水次数

注:在对应降水阈值下,H 表示卫星降水产品能够精确的探测到所发生的降水事件的次数;F 表示卫星降水产品错报的降水事件的次数;M 为卫星降水产品漏掉未报的降水事件的次数;Z 为卫星降水产品准确探测到没有发生的降水事件的次数。

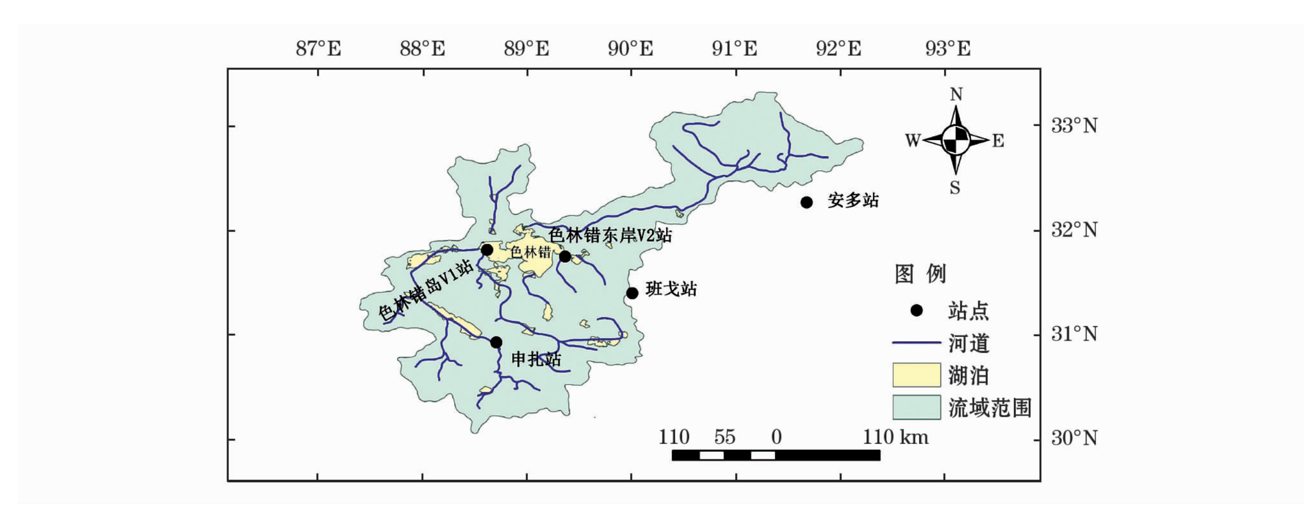


图 1　研究区地面观测站点分布

Fig. 1　Distribution of the meteorological stations in the study area

各种精度评价指标的计算公式见表 2。如果得到相对较小的 PB 值和 RMSE 以及相对较大的 R,说明此类卫星降水产品的降水探测性能更好及其降水数据的精度更高。BIAS 的值代表了卫星降水产品对降水事件的估测精度,BIAS > 1 则高估对应阈值的降水事件,BIAS < 1 则低估对应阈值的降水事件。POD 的值反映发生的降水事件被准确探测的可能性。FAR 的值反映对应阈值的降水事件被错误探测的可能性。HKS 评分的值在 -1 ~ 1 之间,反映卫星降水产品对相应降水阈值的探测性能。如果 BIAS、POD 和 HKS 评分的值越接近 1 以及 FAR 的值越接近 0,就说明该产品的探测性能较好。

表 2　各类指标的计算公式

Tab. 2　Formulas for calculating the metrics

统计指标	公式
相关系数 R	$R = \frac{\mathrm{Cov}(P_\theta, P_0)}{\delta_\theta \delta_0}$
均方根误差 RMSE	$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_\theta - P_0)^2}{n}}$
相对误差 PB	$\mathrm{PB} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_\theta - P_0)}{\sum_{i=1}^{n} P_0}$
频率偏差 BIAS	$\mathrm{BIAS} = \frac{H + F}{H + M}$
探测率 POD	$\mathrm{POD} = \frac{H}{H + M}$
错报率 FAR	$\mathrm{FAR} = \frac{F}{H + F}$
HKS 评分	$\mathrm{HKS} = \frac{H}{H + M} - \frac{F}{F + Z}$

注:P_θ 和 P_0 分别代表卫星降水产品的降水数值和相应的站点观测降水数值,n 是相应站点对应的降水样本数量,Cov 表示对应数据的协方差,δ 代表对应数据的标准差。

3　结果与分析

3.1　日降水量相关性对比

首先,将 3 种不同时间分辨率的数据分别计算出各自的每日降水量。图 2 展示了 GPM 和 TRMM 卫星降水产品的日降水量与地面站点观测资料的对比结果。

整体而言,相对于地面站点的观测结果,TRMM 明显高估了色林错流域的日降水量,而 GPM 则相对较好地估测了该区日降水。尽管各站点的 TRMM 和 GPM 与地面站点的日降水之相关性皆在显著性水平为 0.01 时具有显著意义,但 GPM 的相关系数普遍高于 TRMM,前者的 R 值最高可达 0.65,而对应后者的 R 值仅为 0.40;TRMM 的最大 R 值也仅为 0.47。究其缘由,可能是研究区域位于青藏高原腹地,高原寒带半干旱季风区,海拔高、气温低、表面积雪,造成较强的散射,导致基于微波算法的卫星产品(即 TRMM)捕捉降水粒子能力的下降。

3.2　日降水量误差

在分析日尺度上卫星降水数据相对地面观测站点数据相关性的基础上,进一步对不同卫星产品相对地面观测站点的误差进行分析。绘制时间序列的每日降水量的累积图,图 3 列出了各站点地面观测及卫星产品的降水累积量。

从图 3 可见,GPM、TRMM 和 5 个地面站点观测降水数据的累积曲线都在 6—10 月呈明显的上升趋势,表明卫星观测的降水结果与地面站点观测值具有较为一致的季节分配规律。结合图 3 的统计结果,GPM相对地面站点观测降水的累积误差介于

注:GPM 表示全球降水测量值。

图 2 GPM 及 TRMM 降水数据相对地面站点观测数据散点图

Fig. 2 Scatterplots of precipitation for GPM and the meteorological stations, and TRMM and the meteorological stations

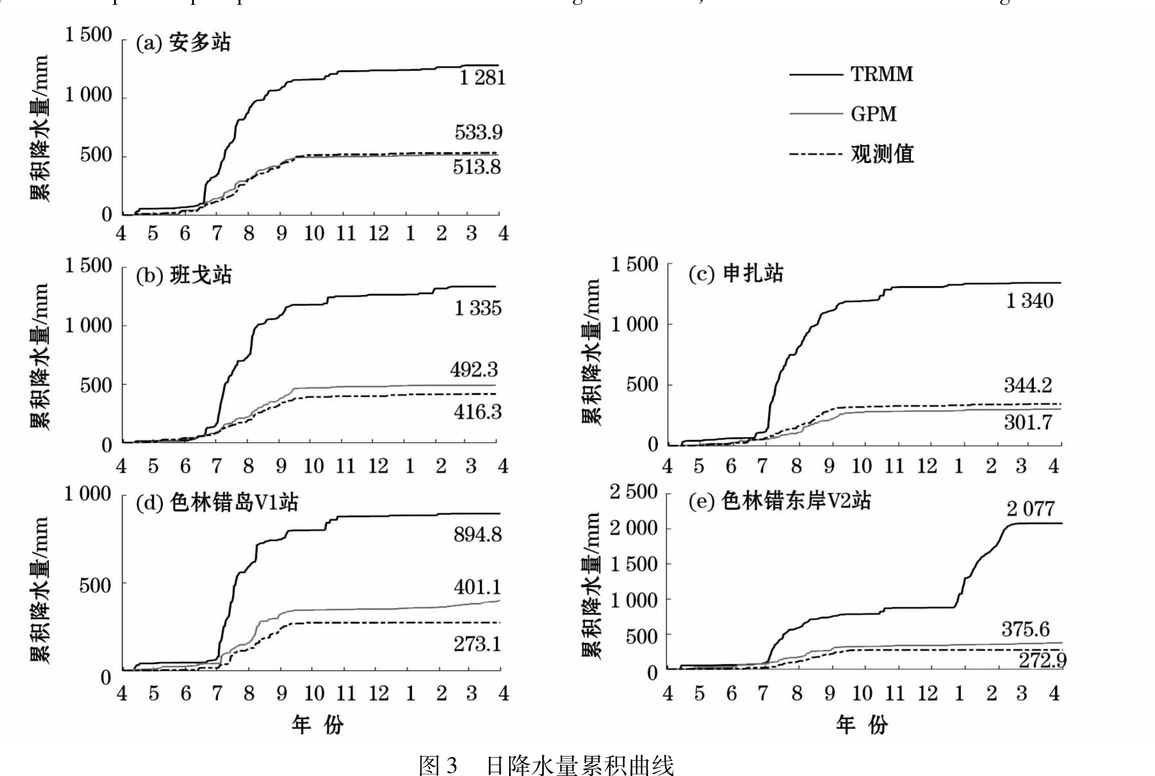


图 3 日降水量累积曲线

Fig. 3 Cumulative curves of daily precipitation at different meteorological stations

表 3　误差统计指标汇总

Tab. 3　Summary of PB and RMSE

站点名称	降水产品	PB	RMSE
申扎站	GPM	-0.123 4	2.064
	TRMM	2.892 9	9.752
班戈站	GPM	0.182 3	2.459
	TRMM	2.205 9	9.664
安多站	GPM	-0.037 6	3.554
	TRMM	1.398 5	9.098
色林错岛 V1 站	GPM	0.468 9	3.067
	TRMM	2.275 9	8.219
色林错东岸 V2 站	GPM	0.376 2	2.508
	TRMM	6.612 7	12.600

-42.486 ~ 128.042 mm;然 TRMM 的累积误差范围却为 621.522 ~ 1 804.670 mm,后者是地面观测值的 2.4 ~ 7.6 倍,这一结果表明,GPM 的降水总量更加接近地面观测数据,TRMM 则相对过高地估计了降水量。

分析表 3,GPM 的 PB 值变化区间相对较小(-12.34% ≤ PB ≤ 46.89%),最小绝对值可达 3.76%,表现出其对降水探测较低的总体误差;反观 TRMM 的 PB 值最小也高达 139.85%,最高可达 661.27%,表现出对降水量极大的高估;同时,同一站点的 GPM 均方根误差 RMSE 值也普遍低于 TRMM 对应的值,表明 GPM 相对站点观测数据的误差平均水平也较低。究其原因,可能是因研究区域海拔高、气温低、降雨少、多冰雹和降雪,由于 GPM 卫星相较于 TRMM 卫星,拥有更广的微波频率波段,能够较好地区分冰雪覆盖层和积雨层,并且能够更好地区分液态和固态降水,亦即降雨和降雪。所以,GPM 相对地面站点观测数据的误差较小,而 TRMM 由于不能很好地区分冰雪覆盖和云层中的降水,导致其对降水量的严重高估。

3.3　日降水事件探测能力的比较

本研究根据国家防汛标准,结合研究区域所处的自然环境,对降水强度等级进行划分:24 h 内总降水量少于 2 mm 为弱降水,在 2 ~ 15 mm 为中等强度降水,大于 15 mm 为强降水。图 4 显示在不同的日降水阈值下,计算得到的 BIAS、POD、FAR 及 HKS 评分值。由图 4 可见,GPM 在降水阈值为 5 $mm \cdot d^{-1}$时,BIAS 值最低,为 0.968 3,降水阈值为 20 $mm \cdot d^{-1}$时,最高达到 1.833,整体变化较为平缓。当降水阈值较高或较低时,GPM 的 BIAS 指标均超过了 1,表明 GPM 对强降水事件和弱降水事件有一定程度的高估;在 2 ~ 15 $mm \cdot d^{-1}$的中等降水强度下,BIAS 值接近 1,表明 GPM 可较为准确地捕捉中等强度降水事件。对于 TRMM 而言,随着日降水阈值的增大,其 BIAS 的值呈明显的递增趋势,最高可达 18.83,最低为 1.484,说明 TRMM 对弱降水、中等降水和强降水事件皆存在显著的高估,尤以高强度降水为甚。对比分析两种卫星产品,GPM 相对 TRMM 具有更优秀的降水探测能力,能够更加准确地估测降水,但是两者对强降水事件的探测性能都不理想。

图 4b 显示 FAR 值的变化情况。可以发现,两种卫星降水产品的错报率 FAR 值都随着降水阈值的增加而增加,说明两种卫星产品对强降水事件的错报可能性较高,对弱降水事件的错报可能性较低。比较两种卫星产品,GPM 的 FAR 值远远低于 TRMM,GPM 在降水阈值为 0.5 $mm \cdot d^{-1}$时,达最小值 0.469 7,对应的 TRMM 最小值为 0.553 8,表明 GPM 对弱、中等强度降水事件有较好的探测性能,但当阈值为 20 $mm \cdot d^{-1}$时,GPM 的 FAR 值大于 TRMM,表明 GPM 对高强度降水事件的探测性能不如 TRMM。

图 4c 展示了 POD 值随着降水阈值的变化情况。可以发现,两者的 POD 值均随着降水阈值的增加而呈显著的递减之势,暗示 GPM 和 TRMM 都对强降水事件的探测能力不足。随着降水阈值的增大,TRMM 的 POD 值逐渐大于 GPM,表明 TRMM 能够更好地探测到降水事件,但是结合前面对两种产品 BIAS 值的分析,虽然 TRMM 能够更好地探测到强降水事件的发生,但是相对 GPM 来说,却过高的估计了相应的降水量。

图 4d 显示 HKS 评分的变化情况。就 GPM 的折线图而言,HKS 评分随着阈值增加而渐渐变小,最小值可低至 -0.006,对应降水阈值在 20 $mm \cdot d^{-1}$左右,最大值可达 0.5 以上,对应的降水阈值约为 1 $mm \cdot d^{-1}$,表明 GPM 对强降水事件较低的探测能力和对弱降水事件较高的探测能力。与此同时,TRMM 的 HKS 评分在降水阈值为 2 $mm \cdot d^{-1}$附近达到最大值,可达 0.48 左右,在降水阈值为 20 $mm \cdot d^{-1}$时为最小值 0.272 3,表明 TRMM 对强降

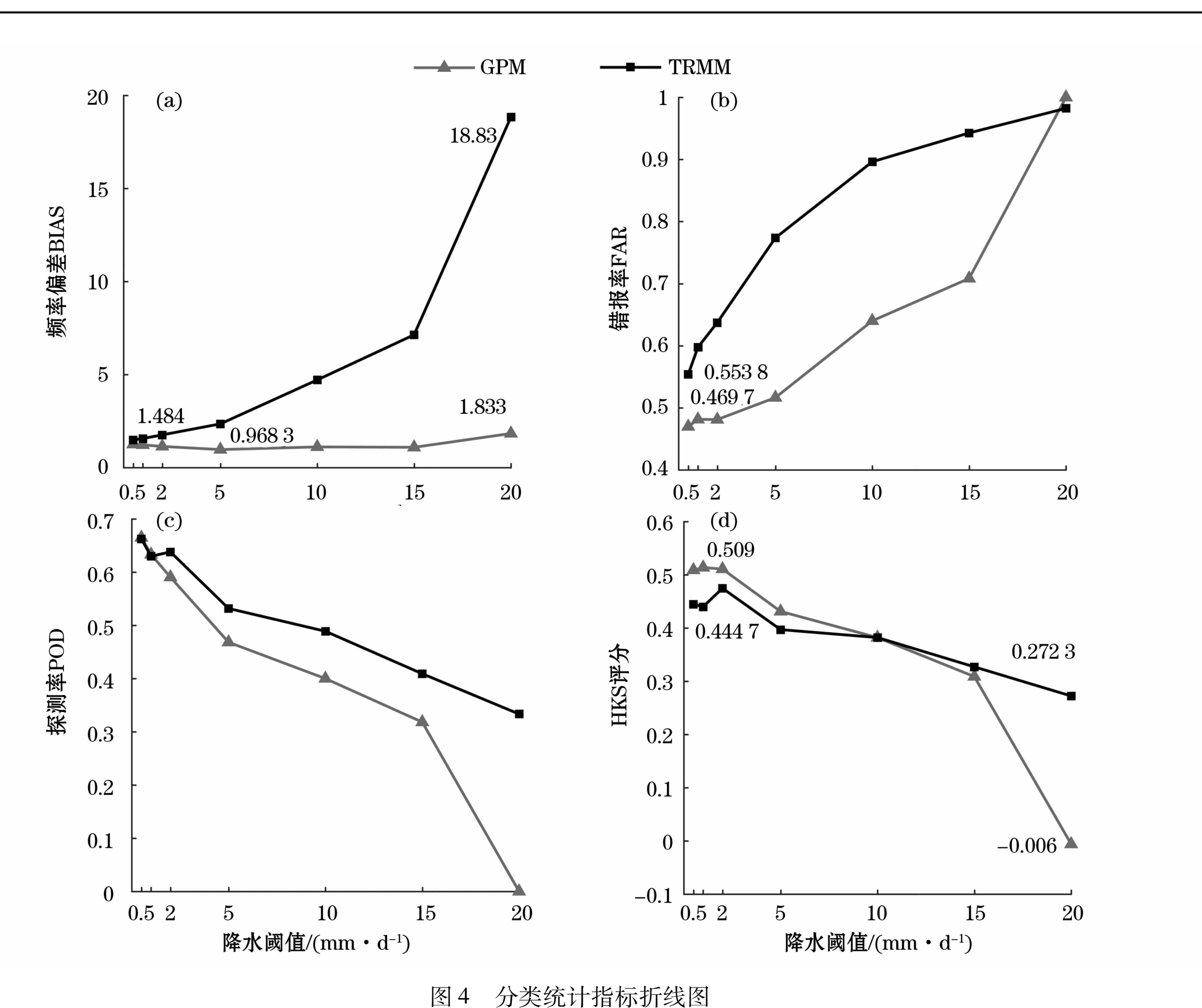


图4 分类统计指标折线图

Fig. 4 Line graphs of the classification statistical index

水事件较低的探测能力和对弱降水事件较高的探测能力。对比分析两种卫星降水产品对应的折线，可以发现，降水阈值在 10 mm·d^{-1} 以下时，GPM 的 HKS 评分都高于 TRMM。反之，在降水阈值高于 10 mm·d^{-1}时，GPM 的 HKS 评分均低于 TRMM。这说明，GPM 对弱降水事件的探测能力明显优于 TRMM，而对强降水事件的探测性能则弱于 TRMM。

整体而言，GPM 和 TRMM 对强降水事件的探测都存在很大缺陷，对弱降水事件则有相对较高的精确度。相比之下，GPM 对弱降水事件的探测能力明显优于 TRMM，能够以更低的误差估测降水量，TRMM 则相对高估了降水量。虽然 TRMM 能够更好地探测到高强度的降水事件，但是高估了其降水量。原因可能是，研究区域地处青藏高原高海拔地区，日降水量普遍偏小，强降水多以固态降雪和冰雹的形式出现，对于卫星产品的探测造成很大困难，因而不能很好地估测降水。其次，GPM 卫星搭载了更高敏感度的雷达[5]，能够观测到较小强度的降水，故 GPM 对于弱降水事件的探测性能优于 TRMM，并能够以相对较低的误差估计降水量。

3.4 不同时间尺度下 GPM 降水产品的评估

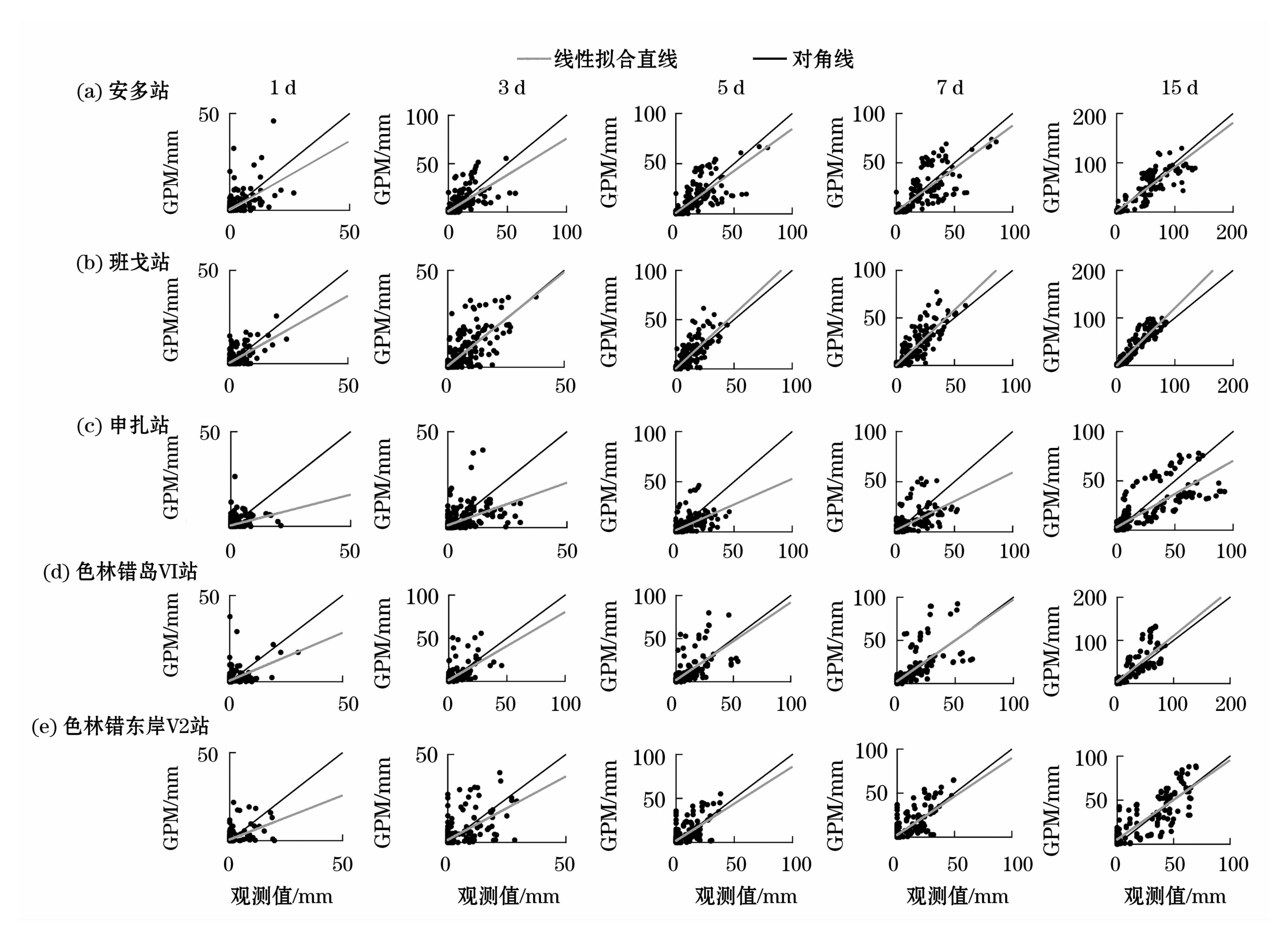
从前面的研究结果可以发现，尽管 GPM 在日尺度上的表现优于 TRMM，然其对地面站点观测数据的误差仍相对较大，最大可达 46.89%（表 3），其相对于地面观测数据的相关系数最高仅为 0.65，最低可达 0.38。因此，本文对比了在更长的时间尺度下，GPM 降水产品的性能。具体而言，本文由 GPM 和地面站点的日降水数据合成 3 d、5 d、7 d、15 d 共 4 种不同时间尺度下的降水数据，研究在不同时间尺度下 GPM 的表现。

就不同时间尺度下的 R 值而言（表 4），当时间尺度增大时，R 值也明显增大，例如，安多站的相关系数 R 值从日尺度下的 0.56 增加到了 15 d 尺度下的 0.9。15 d 的时间尺度下，各地面观测站点对应的相关系数均在 0.8 之上，最高的班戈站相关系数达0.95，表明在此时间尺度下，GPM有较高的精度。

表 4 不同时间尺度下 GPM 降水数据的评价指标

Tab. 4 Summary of the evaluation metrics for GPM at different timescales

站点名称	时间尺度/d	R	P	RMSE	PB	站点名称	时间尺度/d	R	P	RMSE	PB
申扎站	1	0.38	0.000	2.417	-0.123 4	色林错岛 V1 站	1	0.47	0.000	2.614	0.468 9
	3	0.52	0.000	4.190	-0.123 4		3	0.63	0.000	5.992	0.461 2
	5	0.60	0.000	5.763	-0.122 8		5	0.70	0.000	8.347	0.451 8
	7	0.66	0.000	7.104	-0.123 7		7	0.73	0.000	10.300	0.445 3
	15	0.81	0.000	10.390	-0.126 0		15	0.85	0.000	14.190	0.433 6
班戈站	1	0.65	0.000	2.244	0.182 3	色林错东岸 V2 站	1	0.49	0.009	2.431	0.376 2
	3	0.77	0.000	4.934	0.181 1		3	0.62	0.000	4.985	0.374 7
	5	0.84	0.000	6.368	0.179 5		5	0.70	0.000	6.731	0.370 6
	7	0.89	0.000	7.095	0.179 0		7	0.73	0.000	8.263	0.368 5
	15	0.95	0.000	8.712	0.178 4		15	0.85	0.000	11.000	0.363 6
安多站	1	0.56	0.000	2.960	-0.037 6						
	3	0.72	0.000	6.292	-0.037 2						
	5	0.80	0.000	7.748	-0.036 9						
	7	0.83	0.000	9.309	-0.036 5						
	15	0.90	0.000	13.400	-0.035 2						



注:横坐标代表地面站点观测降水数据,纵坐标代表卫星降水数据。

图 5 不同时间尺度下 GPM 降水数据散点图

Fig. 5 Scatterplots of precipitation for GPM of meteorological stations at different timescales

其次,观察不同时间尺度下相对误差 PB 值的变化,可以看出,当时间尺度增加时,PB 值的变化并不显著,这是因为,虽然时间尺度增大,但是卫星探测降水和地面观测降水总量之间的差异并没有太大的变化,故相对误差也不会有明显的变化。不同于相对误差 PB 值,均方根误差(RMSE)却随时间尺度的增大而变大,究其原因,由于时间尺度的增大,导致降水样本数量 n 的减小,而在降水总量变化不大的前提下,RMSE 的值会逐渐增大。

图 5 为不同时间尺度对应的 GPM 降水数据相对地面站点观测数据的散点图,并做线性拟合。从图 5 中能够清楚地看到,随着时间尺度的增大,降水数据点相对集中分布在对角线周边,线性拟合直线更加靠近对角线,表明 GPM 相对地面站点观测资料的相关性更好。

4 结 论

(1) 日降水尺度上,GPM 与地面观测降水的相关性均高于 TRMM。GPM 与地面观测降水的相关系数最大可达 0.56,而 TRMM 最大只有 0.40,尤其在湖泊岸边,TRMM 与地面观测降水的相关系数只有 0.14。累积降水量、相对误差 PB 以及均方根误差 RMSE 表明,在高海拔、寒冷条件下,GPM 卫星降水产品比 TRMM 具有更高的观测精度:2014 年 4 月至 2015 年 3 月 GPM 累积降水误差只有 −42.486 ~ 128.042 mm,而 TRMM 累积降水是地面观测值的 2.4 ~ 7.6 倍。这可能是因为研究区域海拔高,气温低,地表有较多积雪覆盖,造成较强的散射,导致基于微波算法的卫星产品捕捉降水粒子能力的下降。此外,由于 GPM 卫星相较于 TRMM 卫星,拥有更广的微波频率波段,能够较好地区分冰雪覆盖层和积雨层。所以,GPM 卫星降水数据相对地面站点观测数据的误差较小,而 TRMM 由于不能很好地区分冰雪覆盖和云层中的降水,导致其对降水量的严重高估。

(2) 两种产品对强降水事件的探测性能都有不足,对弱降水事件有较高的准确性,但是相比而言,GPM 对弱降水事件的探测能力明显优于 TRMM,而且能够以更低的误差估测降水量,TRMM 则过高的估测了降水量。虽然 TRMM 能够更好地探测到高强度的降水事件,然而它也相对过高估计了降水量。这可能是因为研究区域地处青藏高原高海拔地区,日降水量普遍偏小,强降水多以固态降雪和冰雹的形式出现,而 GPM 卫星搭载了更高敏感度的雷达,能够观测到较小强度的降水,故 GPM 对于弱降水的探测性能优于 TRMM,并且其对降水量的估计误差更小。

(3) 随着统计时间尺度增大,GPM 产品所测的降水结果与地面观测值相关性呈逐渐增大之势。

GPM 是一种全新的全球卫星降水产品,它展现出了相比 TRMM 更好的降水探测性能,为研究地区降水和气候等问题提供数据参考,但是在青藏高原高海拔和气候恶劣地区的探测精度仍有很大的提升空间。其次,由于站点比较稀疏,无法对降水在研究区域的空间分布进行研究。

参考文献(References):

[1] 王乃昂,马宁,陈红宝,等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. 水科学进展,2013,24(2):153 − 160. [Wang Nai'ang, Ma Ning, Chen Hongbao, et al. A preliminary study of precipitation characteristics in the hinterland of Badain Jaran Desert[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2):153 − 160.]

[2] Kidd C, Huffman G J. Global precipitation measurement[J]. Meteorological Applications, 2011, 18(3):334 − 353.

[3] Nicholson S E, Some B, McCollum J, et al. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa. Part II: Validation of TRMM rainfall products[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(10):1 355 − 1 368.

[4] 金晓龙,邵华,张弛,等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报,2016,31(12):2 074 − 2 085. [Jin Xiaolong, Shao Hua, Zhang Chi, et al. The applicability evaluation of three satellite products in Tianshan Mountains[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12):2 074 − 2 085.]

[5] 李慧,杨涛,何祺胜,等. 新疆天山山区 TRMM 卫星降水数据的复合校正方法[J]. 干旱区研究,2017,34(3):585 − 590. [Li Hui, Yang Tao, He Qisheng, et al. Composite correction method of TRMM satellite precipitation data in the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3):585 − 590.]

[6] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用,2015,30(4):607 − 615. [Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and it's latest development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4):607 − 615.]

[7] Tang G, Ma Y, Long D, et al. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533:152 − 167.

[8] He Z, Yang L, Tian F, et al. Intercomparisons of rainfall estimates from TRMM and GPM multisatellite products over the upper Me-

kong River basin[J]. Journal of Hydrometeorology,2017,18(2):413 –430.

[9] Yao T,Thompson L G,Mosbrugger V,et al. Third Pole Environment (TPE)[J]. Environmental Development,2012,3:52 –64.

[10] Yang K,Wu H,Qin J,et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle:A review[J]. Global and Planetary Change,2014,112:79 –91.

[11] 郝振纯,童凯,张磊磊,等. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. 水文,2011,31(5):18 –23.[Hao Zhenchun,Tong Kai,Zhang Leilei,et al. Applicability analysis of TRMM precipitation estimates in Tibetan Plateau[J]. Journal of China Hydrology,2011,31(5):18 –23.]

[12] 张蒙,黄安宁,计晓龙,等. 卫星反演降水资料在青藏高原地区的适用性分析[J]. 高原气象,2016,35(1):34 –42.[Zhang Meng,Huang Anning,Ji Xiaolong,et al. Validation of satellite precipitation products over Qinghai-Xizang Plateau region[J]. Plateau Meteorology,2016,35(1):34 –42.]

[13] 杨志刚,杜军,林志强. 1961—2012 年西藏色林错流域极端气温事件变化趋势[J]. 生态学报,2015,35(3):613 –621.[Yang Zhigang,Du Jun,Lin Zhiqiang. Extreme air temperature changes in Selin Co basin Tibet(1961 –2012)[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(3):613 –621.]

[14] 蔡英,李栋梁,汤懋苍,等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化[J]. 高原气象,2003,22(5):464 –470.[Cai Ying,Li Dongliang,Tang Maocang,et al. Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology,2003,22(5):464 –470.]

[15] 达桑. 近 50 年西藏色林错流域气温和降水的变化趋势[J]. 西藏科技,2011(1):42 –45.[Da Sang. The trend of temperature and precipitation changes in Selin Co basin Tibet in recent 50 years[J]. Tibet Science and Technology,2011(1):42 –45.]

[16] 郭燕红. 色林错湖面蒸发对湖泊水量平衡贡献的观测与模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.[Guo Yanhong. Observation and Simulation Study on Contribution of Water Evaporation to Water Balance over Selin Co Lake[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2016.]

[17] Ma Y,Zhang Y,Yang D,et al. Precipitation bias variability versus various gauges under different climatic conditions over the Third Pole Environment (TPE) region[J]. International Journal of Climatology,2015,35(7):1 201 –1 211.

Applicability of GPM and TRMM Remote Sensing Precipitation Products in the Central Tibet Plateau

YU Kun-lun[1,2], ZHANG Yin-sheng[1,3], MA Ning[1], GUO Yan-hong[1]

(1. *Key Laboratory of Tibetan Environmental Changes and Land Surface Processes*, *Institute of Tibetan Plateau Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*;
3. *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*)

Abstract: In this paper, the uncertainties of satellite precipitation products, both of Global Precipitation Measurement (GPM) and widely used precipitation product—Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), were evaluated based on the data from five meteorological stations in the Silin Co Basin in the Tibetan Plateau during the period from April 2014 to March 2015. The accuracies of GPM and TRMM were studied using the correlation evaluation index (Person Correlation Coefficient R), Error statistical evaluation index (including the root mean square error RMSE and percent bias PB) and classification statistical evaluation index (BIAS, POD, FAR and HKS score). The results showed that: ① The accuracy of GPM was higher than that of TRMM at both daily and annual timescales, and the precipitation was significantly overestimated if the TRMM products were used; ② Although GPM performed better than TRMM in detecting weak precipitation events, there were some big flaws of both products in detecting the heavy precipitation events; ③ The accuracy of GPM was obviously increased with the increase of timescale.

Key words: ground observation; remote sensing precipitation product; GPM; TRMM; applicability evaluation; Tibetan Plateau